

На правах рукописи

Лугинин Михаил Сергеевич

**СВОЙСТВА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОЗОЛЯ
НАДОБЛАЧНОЙ ДЫМКИ ВЕНЕРЫ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СОЛНЕЧНОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ**

Специальность:

01.03.02 — Астрофизика и звёздная астрономия

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в
Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Научный руководитель:

Фёдорова Анна Александровна, к. ф.-м. н., в.н.с. ИКИ РАН

Официальные оппоненты:

Терпугова Светлана Александровна, к. ф.-м. н., с.н.с. ИОА СО РАН

Горбунов Михаил Евгеньевич, д. ф.-м. н., зав. лабораторией ИФА РАН

Ведущая организация:

**Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
(ГАИШ МГУ)**

Защита диссертации состоится **12 мая 2021 года в 14:00.**
на заседании диссертационного совета Д 002.113.04 ИКИ РАН
по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН
и на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2021/luginin.htm>.

Автореферат разослан 9 апреля 2021 года.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 002.113.04

к. ф.-м. н.

Ткаченко А.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Аэрозоль играет ключевую роль в климате Венеры. В отличие от Земли, вся поверхность планеты полностью скрыта от наблюдения сплошным слоем сернокислотных облаков. Из-за этого поверхности планеты достигает лишь четверть солнечной энергии, что напрямую влияет на тепловой баланс Венеры. Кроме того, в виду своей природы аэрозоль участвует в химических циклах сернистого газа и воды, которые являются ключевыми элементами в химических процессах, протекающих в атмосфере и на поверхности планеты. Всё вышесказанное объясняет необходимость изучения аэрозоля.

Исследование свойств аэрозоля надоблачной дымки Венеры с наземных телескопов, а также с орбитальных аппаратов при надирной геометрии наблюдения практически невозможно ввиду её малой оптической толщины (Книббе и др., 1998). Основные сведения об аэрозольных частицах надоблачной дымки были получены из лимбовых наблюдений. При такой геометрии оптический путь и, как следствие, оптическая толщина оказываются на порядок больше по сравнению с надирными экспериментами. Лимбовые наблюдения проводились с бортов космических аппаратов «Венера-9» и «Венера-10» (Краснопольский, 1983) и «Пионер-Венера» (Лэйн и Опстбаум, 1983). Они продемонстрировали наличие субмикронных частиц на высотах, где расположена надоблачная дымка.

Новый импульс изучению облаков и надоблачной дымки Венеры придали научные эксперименты с борта орбитального аппарата «Венера-Экспресс». В частности, предварительный анализ данных солнечного просвечивания, полученных комплексом приборов «СПИКАВ/СУАР» (Монмессан и др., 2008; Вильке и др., 2009), и лимбовых наблюдений прибора «ВИРТИС» (де Кок и др., 2011) продемонстрировал наличие двухмодового распределения в надоблачной дымке на высотах до 90 км. Стоит отметить, что в указанных исследованиях были проанализированы данные с

небольшого (< 5) количества орбит, что не позволяет выявить широтные, временные или годовые вариации свойств аэрозоля.

Цели и задачи работы

Основной целью настоящей диссертационной работы является восстановление свойств и распределения аэрозоля в мезосфере Венеры, которую можно разделить на несколько пунктов:

1. Восстановление высотных профилей аэрозольного коэффициента ослабления;
2. Восстановление высотных зависимостей распределения частиц по размеру и счётной концентрации аэрозоля;
3. Восстановление шкалы высоты аэрозоля;
4. Исследование свойств слоёв аэрозоля.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

1. Реализован метод восстановления коэффициента ослабления аэрозоля, учитывающий влияние атмосферной рефракции и рэлеевского рассеяния атмосферы;
2. Реализован алгоритм моделирования коэффициента ослабления для ансамбля аэрозольных частиц;
3. Реализован метод восстановления распределения частиц по размеру и счётной концентрации из спектральной зависимости коэффициента ослабления аэрозоля;
4. Реализованы метод оценки шкалы высоты аэрозоля по высотному профилю коэффициента ослабления и метод восстановления шкалы аэрозоля из высотных профилей счётной концентрации аэрозоля;
5. Разработана методика детектирования и определения оптических и микрофизических свойств аэрозольных слоёв.

Научная новизна

Все результаты диссертационной работы, представленные к защите, являются новыми.

Впервые был обработан весь массив научных данных прибора «СПИКАВ–ИК», полученный за время работы аппарата «Венера–

Экспресс» в экспериментах по солнечному просвечиванию. Из всех проведённых в период с 2006 по 2014 гг. сеансов солнечного просвечивания были восстановлены и проанализированы высотные профили коэффициента ослабления аэрозоля, были построены средние высотные профили коэффициента ослабления аэрозоля на различных широтах.

Впервые было восстановлено высотное распределение аэрозоля надоблачной дымки аэрозоля Венеры на высотах 74–88 км в период с 2006 по 2014 гг., были получены и проанализированы широтные, временные и годовые вариации размеров частиц для случаев одномодового и двухмодового распределения аэрозоля.

Впервые был проведён систематический анализ оптических и микрофизических свойств слоёв аэрозоля надоблачной дымки Венеры. Впервые был предложен механизм образования аэрозольных слоёв, согласующийся как с результатами диссертации, так и с предыдущими наблюдениями других авторов.

Научная и практическая ценность

Проведённые исследования дают новую информацию о свойствах и распределении аэрозоля в слабо изученной области атмосферы Венеры, какой является верхняя дымка.

Восстановленные высотные профили коэффициента ослабления, высотные зависимости распределения частиц по размерам, высотные профили счётной концентрации, а также значения шкалы высоты аэрозоля могут быть использованы при моделировании атмосферы Венеры, при решении уравнения переноса излучения в атмосфере Венеры, а также как входные данные в моделях общей циркуляции атмосферы.

Методология и методы исследования

Для восстановления высотных профилей объёмного коэффициента ослабления аэрозоля использовался метод «очистки луковицы», являющийся стандартным при решении обратной задачи переноса солнечного излучения в геометрии солнечного

просвечивания. Математическое моделирование коэффициента ослабления для ансамбля аэрозольных частиц проводилось согласно теории Ми. Поиск модели, наилучшим способом приближавшей полученную из эксперимента спектральную зависимость коэффициента ослабления аэрозоля, осуществлялся с помощью алгоритма оптимизации Левенберга–Марквардта. Для восстановления шкалы высоты аэрозоля использовался взвешенный метод наименьших квадратов. Расчёты и моделирование были реализованы в виде комплексов программ, написанных на языках программирования Fortran и MATLAB.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов основана на:

1. их публикации в 4 статьях в высокорейтинговом международном рецензируемом научном журнале *Icarus*, входящем в список ВАК;
2. их представлении на научных семинарах, российских и международных конференциях;
3. сравнении с результатами, полученными другими методами и другими авторами.

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях:

1. Одиннадцатая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 2013 г.
2. XI Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, 2014 г.
3. 40th COSPAR Scientific Assembly, Москва, 2014 г.
4. Двенадцатая Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, 2014 г.
5. EGU General Assembly, Вена, Австрия, 2015 г.

6. European Planetary Science Congress 2015, Нант, Франция, 2015 г.
7. The Sixth Moscow Solar System Symposium, Москва, 2015 г.
8. International Venus Conference 2016, Оксфорд, Великобритания, 2016 г.
9. The Seventh Moscow Solar System Symposium, Москва, 2016 г.
10. EGU General Assembly, Вена, Австрия, 2017 г.
11. Всероссийская астрономическая конференция - 2017 «Астрономия: познание без границ», Ялта, 2017 г.
12. The Eighth Moscow Solar System Symposium, Москва, 2017 г.
 Результаты диссертационной работы неоднократно докладывались на научных семинарах в ИКИ РАН и в Полярном геофизическом институте (г. Апатиты).

В 2013-2017 гг. автор принимал участие в рабочих совещаниях научной группы по обработке и анализу данных экспериментов «СПИКАВ/СУАР» в г. Катания (Италия) и г. Порос (Греция).

В 2014-2015 гг. автор принимал участие в серии международных семинаров, организованных швейцарским институтом ISSI в г. Берн в секции по исследованию облаков и надоблачной дымки Венеры, на которых, в том числе, обсуждались результаты, вошедшие в настоящую диссертацию.

Список публикаций по теме диссертации

Результаты диссертации опубликованы в 4 статьях в международном рецензируемом журнале *Icarus* из перечня ВАК:

1. A. Fedorova, E. Marcq, **M. Luginin**, O. Korablev, J.-L. Bertaux, and F. Montmessin, “Variations of water vapor and cloud top altitude in the Venus’ mesosphere from SPICAV/VEx observations,” *Icarus*, vol. 275, pp. 143–162, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.05.008>
2. **M. Luginin**, A. Fedorova, D. Belyaev, F. Montmessin, V. Wilquet, O. Korablev, J.-L. Bertaux, and A. C. Vandaele, “Aerosol properties in the upper haze of Venus from SPICAV IR data,” *Icarus*, vol. 277, pp. 154–170, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.05.008>
3. Belyaev, D. A., Evdokimova, D. G., Montmessin, F., Bertaux, J.-L., Korablev, O. I., Fedorova, A. A., Marcq, E., Soret, L., **Luginin, M. S.**

Night side distribution of SO₂ content in Venus' upper mesosphere. *Icarus*, vol. 294, pp. 58–71, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.05.002>

4. **M. Luginin**, A. Fedorova, D. Belyaev, F. Montmessin, O. Korablev, J.-L. Bertaux, “Scale heights and detached haze layers at high latitudes of the Venusian mesosphere from SPICAV IR data”, *Icarus*, 2018. <http://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.03.018>

Личный вклад автора

Все работы из списка публикаций по теме диссертации выполнены в соавторстве. Результаты диссертации и выносимые на защиту положения основаны на работах [Luginin et al., 2016; Luginin et al., 2018]. В этих работах автору принадлежит ключевая роль: автором осуществлялись поиск, отбор и обработка данных эксперимента по солнечному затмению прибора «СПИКАВ–ИК», интерпретация полученных результатов, их оформление и представление.

В работе [Fedorova et al., 2016] использовались восстановленные автором величины шкалы высоты аэрозоля, а в работе [Belyaev et al., 2018] — восстановленные автором величины эффективного радиуса и счётной концентрации аэрозоля. Выводы, полученные в работах [Fedorova et al., 2016; Belyaev et al., 2018], в диссертационной работе не используются и на защиту не выносятся.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, благодарностей, четырёх приложений и списка литературы. Работа содержит 133 страницы, 45 рисунков и 7 таблиц. Список литературы насчитывает 156 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** аргументирована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, обоснованы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту,

перечислены использованные методы исследования, описаны степень достоверности и апробация полученных результатов, личный вклад автора и объём работы.

В главе 1 по литературным источникам проведён обзор исследований аэрозоля облаков и дымки Венеры по данным дистанционного зондирования (раздел 1.1) и с помощью спускаемых аппаратов (раздел 1.2). В разделе 1.3 представлен краткий обзор вопроса о природе неизвестного поглотителя ультрафиолетового излучения.

Глава 2 посвящена восстановлению аэрозольного коэффициента ослабления надоблачной дымки из данных эксперимента по солнечному просвечиванию (СП) прибора «СПИКАВ–ИК».

В разделе 2.1 представлен краткий обзор атмосферных исследований, выполненных методом СП. Этот метод широко применяется для определения содержания малых газовых составляющих (H_2O , O_2 , O_3 , CO_2 , NO_2 и др.), оптических и микрофизических характеристик атмосферного аэрозоля, плотности нейтральной атмосферы на многих спутниках и станциях на орбите Земли, а также на спутниках Марса и Венеры.

В разделе 2.2 дано краткое описание принципа СП. На борту космического аппарата (КА) спектрометр регистрирует солнечное излучение, прошедшее через различные слои атмосферы планеты, в процессе восхода или захода Солнца за горизонт планеты (Рисунок 1). Отношение прошедшего сквозь атмосферу солнечного излучения $I(\lambda, z)$ к неискажённому атмосферой солнечному излучению $I_0(\lambda)$ позволяет получить значение пропускания атмосферы на прицельной высоте z и длине волны λ : $T(\lambda, z) = \frac{I(\lambda, z)}{I_0(\lambda)}$. Траектория распространения излучения искривляется в результате рефракции, а величина атмосферного пропускания уменьшается в результате поглощения излучения газами, молекулярного (рэлеевского) рассеяния и аэрозольного рассеяния и поглощения. При восстановлении микрофизических свойств и параметров распределения аэрозольных частиц надоблачной дымки Венеры по данным прибора «СПИКАВ–ИК» использовалось излучение на длинах волн вне полос поглощения

газов, вследствие чего необходимость учёта поглощения излучения газами отсутствует.

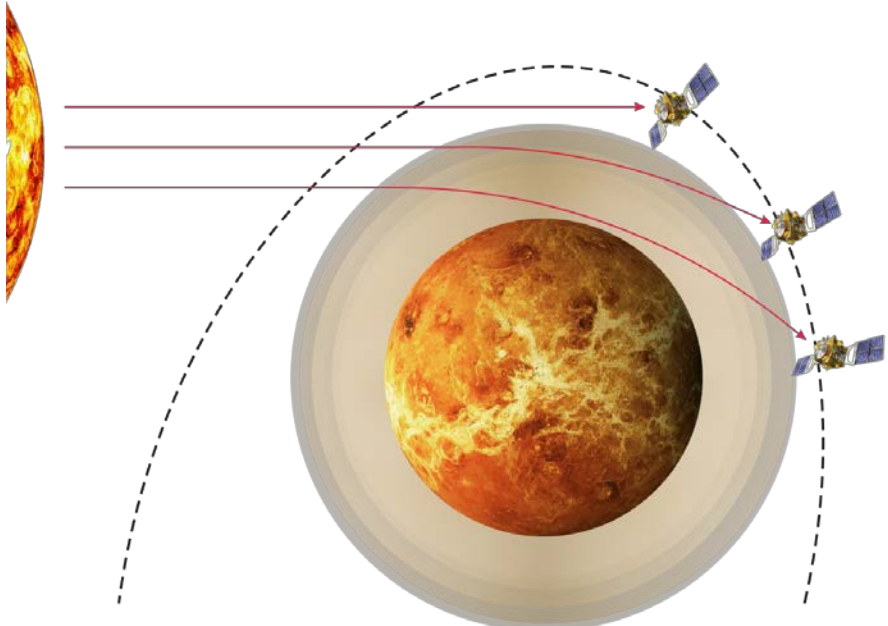


Рисунок 1. Принципиальная схема эксперимента по солнечному просвечиванию атмосферы Венеры.

В разделе 2.3 приведены преимущества и недостатки метода СП при восстановлении высотных профилей объёмного коэффициента ослабления аэрозоля. Среди преимуществ можно выделить высокую точность измерения излучения, простоту алгоритма восстановления физических характеристик аэрозоля, высокую чувствительность по отношению к концентрации аэрозоля, отсутствие необходимости проведения абсолютной калибровки прибора и высокое вертикальное разрешение. Недостатками метода СП являются ограниченность местного времени наблюдения, т.к. измерения проводятся только на терминаторах при восходах и заходах Солнца, а также низкое горизонтальное разрешение.

В разделе 2.4 рассмотрен вопрос учёта влияния атмосферной рефракции. При распространении света сквозь неоднородную среду с переменным показателем преломления его траектория отклоняется от прямолинейной в направлении увеличения показателя преломления. Для каждого измерения проводилась коррекция прицельной высоты, типичная величина коррекции составляла 3 км на высоте 70 км и 1 км на высоте 80 км при расстоянии до лимба 5000 км. Влияние ослабления излучения в результате рефракции пренебрегалось ввиду его малости.

В разделе 2.5 описана процедура восстановления высотных профилей аэрозольного коэффициента ослабления. Прошедшее через атмосферу солнечное излучение подчиняется закону Бугера–Ламберта–Бера, из которого вычислялась величина оптической толщины на луче зрения. Коэффициент ослабления является суммой коэффициентов ослабления аэрозоля и молекулярного рассеяния. Для восстановления коэффициентов ослабления аэрозоля вначале из величин оптической толщины на луче зрения методом «очистки луковицы» (Роджерс, 2000) восстанавливался общий коэффициент ослабления, из которого затем вычитался коэффициент молекулярного ослабления. В конце раздела приводится доказательство необходимости учёта молекулярного рассеяния.

В разделе 2.6 представлено краткое описание прибора «СПИКАВ–ИК». Спектрометр в своей основе имеет акустооптический перестраиваемый фильтр и два охлаждаемых детектора, регистрирующих излучение во взаимно перпендикулярных поляризациях в спектральном диапазоне 0.65–1.7 мкм (Кораблёв и др., 2012). Поле зрения в режиме СП — круговое с диаметром 0.07°. Орбита аппарата «Венера–Экспресс» — высокоэллиптическая, в результате чего вертикальное разрешение в экспериментах по СП варьировалось от 1 до 25 км. Перицентр орбиты был расположен почти над северным полюсом (80°с.ш.). Период обращения спутника вокруг планеты был равен 24 земным часам. Для восстановления свойств аэрозоля при проведении экспериментов по СП использовалось излучение на 10 длинах волн в диапазоне 0.65–1.6 мкм.

В разделе 2.7 описан процесс отбора наблюдений. За время функционирования КА «Венера-Экспресс» было проведено 798 экспериментов по СП; первое было проведено 26 мая 2006 г., а последнее — 27 ноября 2014 г. При обработке данных с некоторых сеансов СП нами была выявлена проблема нестабильности солнечного сигнала вне атмосферы (Рисунок 2).

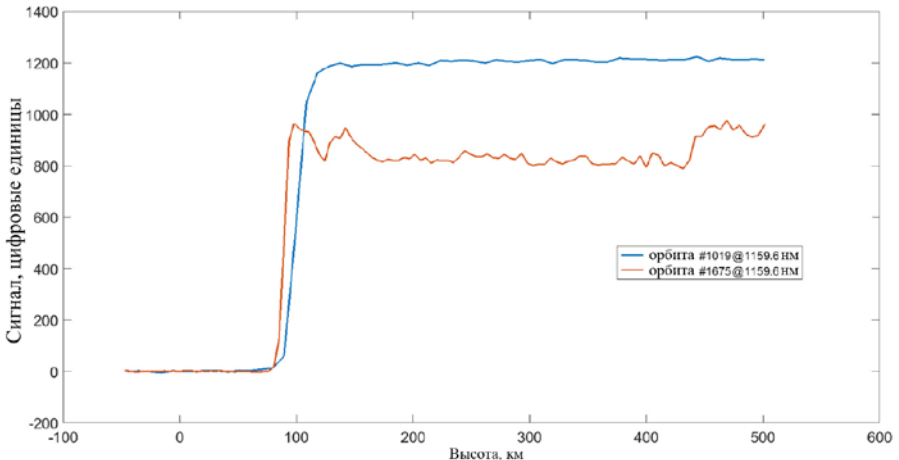


Рисунок 2. Высотный профиль солнечного сигнала, на орбитах №1019 (голубая кривая) и №1675 (оранжевая кривая) на длине волны 1160 нм. Данные с орбиты №1675 являются типичным примером флуктуаций солнечного сигнала.

Наблюдаемые флуктуации солнечного сигнала оказались нерегулярными и непредсказуемыми. Более того, среднее значение солнечного спектра изменялось от орбиты к орбите, что свидетельствует об изменении направления наведения оси прибора на Солнце. Флуктуации во время сеанса возникали при «блуждании» поля зрения прибора по диску вследствие эффекта потемнения солнечного диска к краю. Для проведения анализа были отобраны 222 «хороших» сеансов СП, во время которых отношение среднеквадратичного отклонения солнечного сигнала к среднему солнечному сигналу вне атмосферы на всех длинах волн не превышало 3%.

В разделе 2.8 описаны процедуры оценки погрешностей пропускания, оптической толщины на луче зрения и коэффициента ослабления аэрозоля.

В разделе 2.9 представлены результаты главы 2. Были восстановлены высотные профили пропускания, оптической толщины на луче зрения и коэффициента ослабления аэрозоля на десяти длинах волн для всего набора рассматриваемых орбит. Была проанализирована широтная зависимость высоты, на которой достигается единичная оптическая толщина (высота дымки). Величина высоты дымки оказалась больше вблизи экватора и на более коротких длинах волн.

На Рисунке 3 показаны усреднённые высотные профили коэффициента ослабления на длине волны 1197 нм, сгруппированные по терминаторам и широтным областям 0° – 60° и 60° – 90° в предположении сферической симметрии. Величина коэффициента ослабления ниже на высоких широтах по сравнению с низкими широтами. Разницы между двумя терминаторами не выявлено.

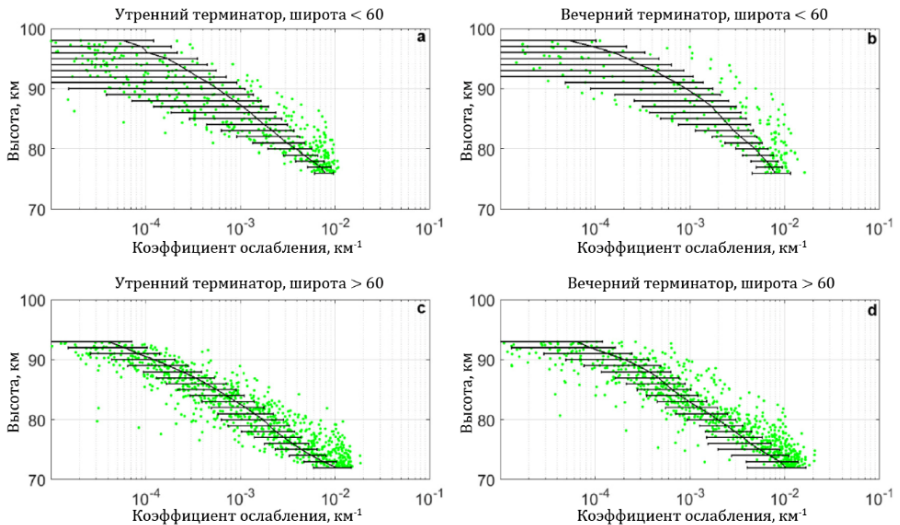


Рисунок 3. Усреднённые профили коэффициента ослабления (черные кривые со стандартным отклонением) на длине волны 1197 нм в диапазонах широт 0° – 60° (a, b) и 60° – 90° (c, d) на утреннем (a, c) и

вечернем (b, d) терминаторах. Отдельные измерения коэффициента ослабления показаны зелёными точками.

В разделе 2.10 приводится обсуждение полученных результатов и их сравнение с измерениями приборов «СУАР» (Вильке и др., 2012), «ВИРТИС» (Игнатъев и др., 2009) и «СПИКАВ–ИК» (Фёдорова и др., 2016) на борту КА «Венера–Экспресс». Сделан вывод о согласии данных указанных экспериментов с нашими результатами.

Глава 3 посвящена восстановлению высотного распределения аэрозольных частиц по размеру в надоблачной дымке из данных эксперимента по СП прибора «СПИКАВ–ИК».

В разделе 3.1 описывается моделирование коэффициента ослабления, обусловленного ансамблем аэрозольных частиц. Частицы моделировались в виде капель серной кислоты сферической формы, распределённые по логарифмически-нормальным одномодовым и двухмодовым функциям распределения, показатель преломления брался из работы Хаммэла и др. (1988) для массовой концентрации 75 % и температуры 215 К.

В разделе 3.2 описан алгоритм восстановления размеров и концентраций аэрозольных частиц надоблачной дымки Венеры и представлены результаты восстановления. Для восстановления свойств аэрозоля использовалась информация, содержащаяся в спектральной зависимости коэффициента ослабления аэрозоля. Для этого использовался алгоритм оптимизации Левенберга–Марквардта, подгонявший модели под экспериментальные данные. В качестве конкурирующих моделей выступали одномодовое и двухмодовое распределения аэрозоля, выбор между которыми осуществлялся на основании информационного критерия Байеса. После успешного восстановления распределения аэрозольных частиц по размеру проводился расчёт счётной концентрации.

На Рисунке 4 представлены примеры экспериментальных спектров относительного коэффициента ослабления аэрозоля и одномодовых и двухмодовых моделей, наилучшим способом приближающих экспериментальные данные. В первом случае (панель а) выбирается одномодовое распределение, во втором (панель б) —

двухмодовое. Стоит отметить, что в обоих случаях одномодовое распределение является неплохим приближением.

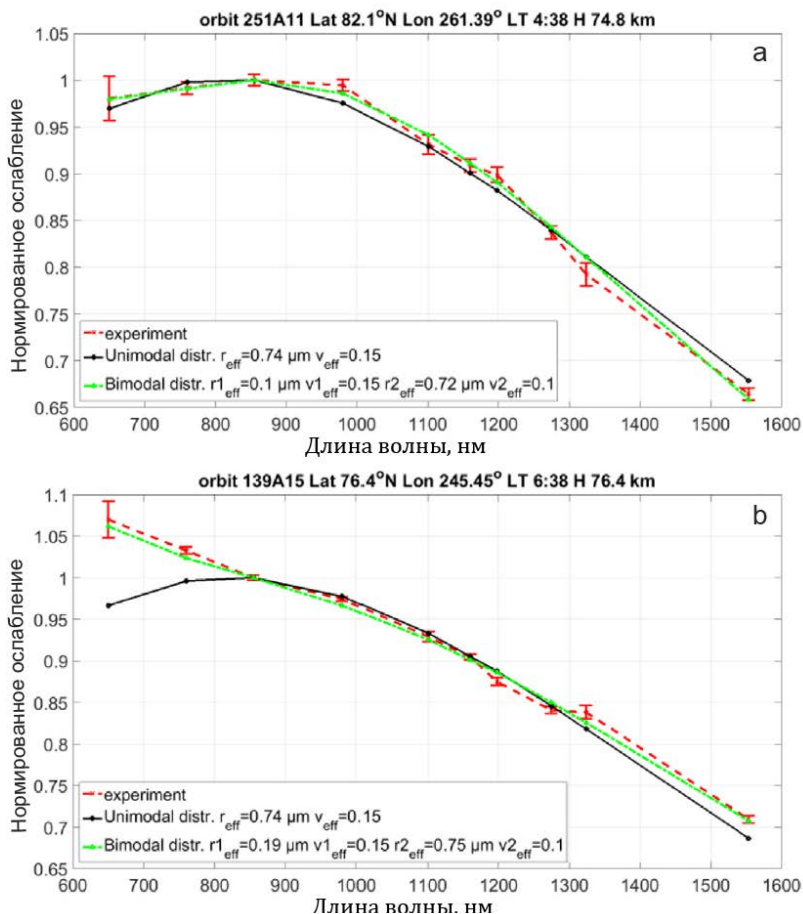


Рисунок 4. Спектральная зависимость относительного коэффициента ослабления аэрозоля: из эксперимента (красная кривая с погрешностями), лучшая модель одномодового распределения (черная кривая), лучшая модель двухмодового распределения (зелёная кривая).

Эффективные радиусы частиц были восстановлены из данных 222 «хороших» сеансов СП. В большинстве наблюдений эффективные радиусы уменьшаются с увеличением высоты. Для изучения различий между утренним и вечерним терминаторами и полярными и неполярными областями были посчитаны средневзвешенные величины эффективных радиусов в широтных диапазонах 60° ю.ш.- 60° с.ш. и 60° с.ш.- 90° с.ш. и диапазонах местного времени 4-8 ч. и 16-20 ч. Широтные вариации показали, что радиус при одномодовом распределении оказывается меньше в приполярной области. При двухмодовом распределении широтной зависимости радиусов моды 1 не обнаружено, а разница между значениями радиусов моды 2 оказывается в пределах стандартного отклонения. Средние значения эффективного радиуса равны 0.12 ± 0.03 мкм и 0.84 ± 0.16 мкм для мод 1 и 2 двухмодового распределения соответственно и 0.54 ± 0.25 мкм для одномодового распределения. Усреднённые профили концентрации для обеих мод плавно уменьшаются с высотой, со значения 500 см^{-3} на 75 км до $\approx 50 \text{ см}^{-3}$ на 90 км для моды 1 и с $\approx 1 \text{ см}^{-3}$ на 75 км до $\approx 0.1 \text{ см}^{-3}$ на 90 км для моды 2. Величины для моды 2 совпадают со значениями счётной концентрации в одномодовом случае. Шкала высоты для среднего профиля равна ≈ 5.5 км для обеих мод.

В конце раздела обсуждаются полученные результаты, приводится их сравнение с результатами предыдущих экспериментов и с предсказаниями моделей.

Глава 4 посвящена восстановлению шкалы высоты аэрозоля из высотных профилей коэффициента ослабления и счётной концентрации моды 2, полученных из данных эксперимента по солнечному просвечиванию прибора «СПИКАВ–ИК».

В разделе 4.1 дано определение шкалы высоты аэрозоля, а в разделе 4.2 описан метод восстановления шкалы аэрозоля. Для восстановления шкалы высоты использовался взвешенный метод наименьших квадратов, аппроксимирующий экспериментальные данные прямой. Перед аппроксимацией и счётная концентрация, и коэффициент ослабления логарифмировались.

В разделе 4.3 описаны результаты главы 4. Из данных 222 высотных профилей коэффициента ослабления были восстановлены

шкалы высоты аэрозоля. Величины шкалы высоты в основном лежат в диапазоне 3–5 км. Средние величины равны 4 км на 650 нм и 3.3 км на 1554 нм на обоих терминаторах.

Для восстановления шкалы высоты из профилей счётной концентрации были отобраны 43 сеанса СП, проведённые с августа 2006 г. по август 2009 г. и охватывающие диапазон широт 46° ю.ш.– 88° с.ш. На Рисунке 5 показана карта шкалы высоты в полярных координатах широта и местное время, содержащая все значения шкалы высоты, профили которых содержат высоту 82 км. Самые большие величины шкалы высоты наблюдаются над полярной областью на широтах 82° с.ш.– 90° с.ш. и равны 4–5.5 км. Это справедливо как для утреннего, так и для вечернего терминаторов. На более низких широтах, в диапазоне 60° с.ш.– 80° с.ш., шкала высоты оказывается меньше: 2–4 км на утреннем терминаторе и 3–4 км — на южном.

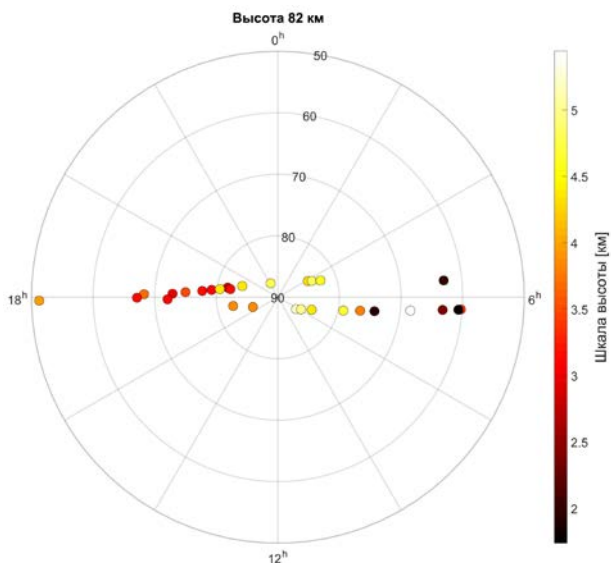


Рисунок 5. Карта восстановленных величин шкалы высоты в полярных координатах широта и местное время.

В разделе 4.4 обсуждаются полученные результаты, приводится их сравнение с результатами экспериментов на КА «Венера-9» и «Венера-10» (Краснопольский, 1983), «Пионер-Венера» (Лэйн и Опстбаум, 1983) и «Венера-15» (Засова и др., 1993). Делается вывод, что наши измерения согласуются с предыдущими исследованиями.

Глава 5 посвящена оценке коэффициента турбулентной диффузии и вертикальной компоненты скорости ветра в полярной области атмосферы Венеры.

В разделе 5.1 приведено описание метода восстановления коэффициента турбулентной диффузии и оценки вертикальной скорости ветра.

В разделе 5.2 описаны результаты главы 5. Коэффициент турбулентной диффузии, рассчитанный из значений средней шкалы высоты для аэрозольной моды 2, равен $K = 2 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{с}$ на 84 км. Профили вертикальной скорости ветра были рассчитаны для 43 значений шкалы высоты. Абсолютные значения скорости ветра экспоненциально возрастают с высотой с максимума $\approx 2 \text{ см/с}$ на 80 км до $\approx 10 \text{ см/с}$ на 90 км.

На Рисунке 6 представлена карта скоростей ветра на высоте 82 км в северном полушарии в полярных координатах широта и местное время.

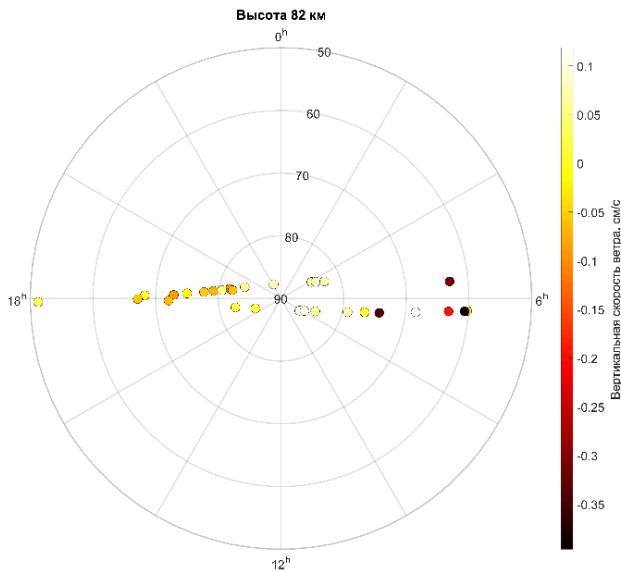


Рисунок 6. Карта вертикальных скоростей ветра на высоте 82 км в полярных координатах широта и местное время.

В полярной области (82°с.ш.-90°с.ш.) скорость ветра равна 0.2-0.8 см/с и направлена вверх. Эта область соответствует максимальным значениям шкалы высоты. В области 60°с.ш.-80°с.ш. ветер оказывается направленным вниз и равен $-2.8-0$ см/с на утреннем терминаторе и $-0.8-0$ см/с на вечернем. Эта область соответствует минимальным значениям шкалы высоты аэрозоля.

В разделе 5.3 обсуждаются предложенный метод и полученные результаты, приводится их сравнение с итогами экспериментов на КА «Венера-9», «Венера-10» (Краснопольский, 1983) и «Пионер-Венера» (Лэйн и Опстбаум, 1983). Кроме того, приводится обсуждение недостатков предложенного метода.

Глава 6 посвящена детектированию и исследованию свойств аэрозольных слоёв в надоблачной дымке Венеры.

В разделе 6.1 описаны отобранные наблюдения, содержащие аэрозольные слои (АС). АС были детектированы только на высоких широтах в северном полушарии, где достигалось наилучшее вертикальное разрешение. Среди 147 «хороших» сеансов СП в

диапазоне широт 58°с.ш.-90°с.ш. АС наблюдались в 45 сеансах на утреннем терминаторе и в 48 сеансах на вечернем.

Раздел 6.2 содержит описание метода детектирования аэрозольных слоёв и определения их оптических и микрофизических свойств. Наличие АС определялось по инверсии в высотных профилях пропускания, оптической толщины на луче зрения, коэффициента ослабления и эффективного радиуса. Для каждого АС определялись следующие параметры: верхняя и нижняя граница, вертикально проинтегрированные оптические толщины, высота, радиус и счётная концентрация, а также относительное изменение вертикальное оптической толщины, радиуса и концентрации относительно «невозмущённых» профилей. В конце раздела приводится исследование чувствительности рассчитанных свойств АС к параметрам верхней и нижней границы.

В разделе 6.3 представлены результаты главы 6. АС в основном были детектированы в диапазоне высот 80–90 км. Наблюдается значительная зависимость высоты АС от местного времени: АС на вечернем терминаторе в среднем расположены на 6 км выше, чем на утреннем. Число орбит, содержащих АС, увеличивается при переходе от средних широт к полюсу, что объясняется лучшим вертикальным разрешением на более высоких широтах.

Распределение вертикальной оптической толщины имеет широкий максимум, наблюдаемый при $\tau_{AC} = (0.8-3) \cdot 10^{-3}$ как на утреннем, так и на вечернем терминаторах. Распределение радиуса АС на утреннем терминаторе показывает очень широкий максимум, охватывающий диапазон от 0.4 мкм до 0.9 мкм, на вечернем терминаторе наблюдаются два максимума, в диапазонах 0.3-0.5 мкм и 0.7-1.0 мкм. Распределение счётной концентрации демонстрирует ту же картину, с единственным максимумом на утреннем терминаторе в диапазоне 0.2-1 см⁻³ и двумя максимумами на вечернем терминаторе, в диапазонах 0.1-0.5 см⁻³ и 2-7 см⁻³, которые соответствуют второму и первому максимумам радиусов. В конце раздела проводится анализ содержащих АС последовательностей СП, которые позволяют следить за изменениями свойств аэрозольных слоёв от орбиты к орбите.

В разделе 6.4 приведено обсуждение полученных результатов, приводится их сравнение с итогами экспериментов на КА «Пионер-Венера» (Лэйн и Опстбаум, 1983). Высотная статистика АС, наблюдавшихся в предыдущих исследованиях, соответствует нашим результатам. Также в разделе рассматриваются возможные механизмы образования аэрозольных слоёв. Сделан вывод, что единственным механизмом, согласующимся с результатами диссертационной работы и наблюдениями других авторов, является конденсация водяного пара на существующих частицах водного раствора серной кислоты.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

В **приложении А** дан список сеансов солнечного просвечивания и соответствующих географических параметров наблюдений, проанализированных в Главах 2 и 3. В **приложении Б** излагается описание алгоритма оптимизации Левенберга–Марквардта. В **приложении В** приведён список сеансов солнечного просвечивания и соответствующих географических параметров наблюдений, проанализированных в Главах 4 и 6. Кроме того, приводятся значения шкал высот и свойства аэрозольных слоёв, полученные в этих сеансах. В **приложении Г** излагается разработанный алгоритм построения одномерных и двумерных модифицированных гистограмм.

ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Средняя высота дымки на длине волны 650 нм равна 88 км на широтах 0° – 60° и 82 км на широтах 60° – 90° ; на длине волны 1554 нм средняя высота дымки на 2 км ниже. Разница между терминаторами меньше величины вариаций наблюдений. Средние величины коэффициента ослабления аэрозоля убывают с высотой по экспоненциальному закону. На высоких широтах средние величины коэффициента ослабления меньше. Разница между терминаторами меньше величины вариаций наблюдений.
2. В верхней дымке Венеры на высотах 72–90 км в период с 2006 по 2014 гг. детектировались аэрозольные частицы моды 1 и моды 2. Средняя величина эффективного радиуса для двухмодового распределения равна 0.12 ± 0.03 мкм для моды 1 и 0.84 ± 0.16 мкм для моды 2. Средняя величина эффективного радиуса для одномодового распределения равна 0.54 ± 0.25 мкм. На высоте 75 км средняя счётная концентрация аэрозольных частиц моды 1 равна 500 см^{-3} , моды 2 — 50 см^{-3} и уменьшается с высотой по экспоненциальному закону со шкалой высоты ≈ 5.5 км.
3. Большинство значений шкалы высоты аэрозоля лежит в диапазоне 1.5–5.5 км. Усреднённая величина равна 2–4 км на широтах 60° – 80° с.ш. и 4–5.5 км на широтах 82° – 90° с.ш. Из среднего значения шкалы высоты аэрозоля 3.6 км была сделана оценка коэффициента турбулентной диффузии $K = 2 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{с}$ на высоте 84 км. Получены оценки вертикальной скорости ветра, равные 0.2–0.8 см/с на широтах 82° – 90° с.ш. и –2.8–0 см/с на широтах 60° – 80° с.ш. на высоте 82 км.
4. В 93 сеансах затмения с 2006 по 2013 гг. в широтном диапазоне 58° – 90° с.ш. наблюдались слои аэрозоля. На утреннем терминаторе они наблюдались преимущественно на высотах 80–88 км, на вечернем — на высотах 84–90 км. Максимум распределения вертикальной оптической толщи аэрозольных слоёв приходится на диапазон $(0.8\text{--}3) \cdot 10^{-3}$. Предложенный механизм образования аэрозольных слоёв, заключающийся в конденсации водяного пара на каплях водного раствора серной кислоты, согласуется с нашими результатами и наблюдениями других авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вильке и др., 2012. [Wilquet, V., Fedorova, A., Montmessin, F., Drummond, R., Mahieux, A., Vandaele, A., . . . Bertaux, J.-L. (2009). Preliminary characterization of the upper haze by SPICAV/SOIR solar occultation in UV to mid-IR onboard Venus Express. *Journal of Geophysical Research*, 114, E00B42].
2. Де Кок и др., 2011. [De Kok, R., Irwin, P., Tsang, C., Piccioni, G., & Drossart, P. (2011). Scattering particles in nightside limb observations of Venus' upper atmosphere by Venus Express VIRTIS. *Icarus*, 211(1), 51-57].
3. Засова и др., 1993. [Zasova, L., Moroz, V., Esposito, L., & Na, C. (1993). SO₂ in the Middle Atmosphere of Venus: IR Measurements from Venera-15 and Comparison to UV Data. *Icarus*, 105(1), 92-109].
4. Игнатъев и др., 2009. [Ignatiev, N., Titov, D., Piccioni, G., Drossart, P., Markiewicz, W., Cottini, V., . . . Manoel, N. (2009). Altimetry of the Venus cloud tops from the Venus Express observations. *Journal of Geophysical Research*, 114(8), E00B43].
5. Книббе и др., 1998. [Knibbe, W. J. J., de Haan, J. F., Hovenier, J. W., & Travis, L. D. (1998). Analysis of temporal variations of the polarization of Venus observed by Pioneer Venus Orbiter. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 103(E4), 8557–8574].
6. Кораблёв и др., 2012. [Korablev, O., Fedorova, A., Bertaux, J.-L., Stepanov, A., Kiselev, A., Kalinnikov, Y., . . . Neefs, E. (2012). SPICAV IR acousto-optic spectrometer experiment on Venus Express. *Planetary and Space Science*, 65(1), 38-57].
7. Краснопольский, 1983. [Krasnopolsky, V. (1983). Venus spectroscopy in the 3000–8000Å region by Veneras 9 and 10. B D. Hunten, L. Colin, T. Donahue, & V. Moroz, *Venus* (p. 459-483). Tucson: The University of Arizona press].

8. Лэйн и Опстбаум, 1983. [Lane, W., & Opstbaum, R. (1983). High altitude Venus haze from Pioneer Venus limb scans. *Icarus*, 54(1), 48-58].
9. Монмессан и др., 2008. [Montmessin, F., Fedorova, A., Wilquet, V., Mahieux, A., Drummond, R., Korablev, O., . . . Bertaux, J. (2008). Venusian Upper Haze Properties: Detection of a Multimodal Distribution at High Altitude by SPICAV/SOIR. American Geophysical Union, Fall Meeting 2008, abstract id.P33A-1428].
10. Роджерс, 2000. [Rogers, C. (2000). *Invers methods for atmospheric sounding. Theory and practice*. Singapore: World Scientific].
11. Фёдорова и др., 2016. [Fedorova, A., Marcq, E., Luginin, M., Korablev, O., Bertaux, J.-L., & Montmessin, F. (2016). Variations of water vapor and cloud top altitude in the Venus' mesosphere from SPICAV/Vex observations. *Icarus*, 275, 143–162].
12. Хаммэл и др., 1988. [Hummel, J., Shettle, E., & Longtin, D. (1988). *A New Background Stratospheric Aerosol Model for Use in Atmospheric Radiation Models*. Burlington].